

Lara-Hernández, C.; Melo-González, R.; Herrera-Ruiz, D.A.; Valdez-Gómez, J. A.

Control estadístico de procesos en tiempo real de un sistema de endulzamiento de gas
amargo. Metodología y resultados

Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 26, núm. 2, julio-diciembre, 2011, pp. 57-74

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos

Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=48221175002>



Tecnología, Ciencia, Educación

ISSN (Versión impresa): 0186-6036

imiqac@sercom.com.mx

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos

México

Control estadístico de procesos en tiempo real de un sistema de endulzamiento de gas amargo. Metodología y resultados

Statistical process control in real time for a sour gas sweetening system. Methodology and results

Lara-Hernández, C.^{1}, Melo-González, R.¹, Herrera-Ruiz, D.A.², Valdez-Gómez, J. A.²*

¹ Confiabilidad de Sistemas. Instituto Mexicano del Petróleo. Dirección Regional Marina. México. Correo-e(e-mail): clara@imp.mx

² Pemex Exploración y Producción GTDH-MNE. México

RESUMEN

El control estadístico de procesos es una herramienta que permite mantener un proceso productivo dentro de límites aceptables, para lograr productos que cumplan con las especificaciones requeridas, pudiendo incluso disminuir costos de producción. Sin embargo, la implantación del control estadístico de procesos requiere de la definición de las variables críticas de entrada y salida, conocidas como parámetros clave de operación e indicadores clave del proceso, respectivamente, siendo la primera las variables que hay que controlar para cumplir con las especificaciones de las segundas. El proceso de definición de variables críticas involucra la aplicación de herramientas y metodologías, las cuales deben ser dadas por un equipo de trabajo conformado por un líder de la metodología y por especialistas en el proceso que se esté analizando. Parte medular del control estadístico de procesos es el análisis estadístico de las variables críticas, el cual requiere información confiable y suficiente sobre las variables en cuestión y debe tomarse para periodos de tiempo en los cuales el proceso haya exhibido un comportamiento estable y normal. Si la planta a analizar cuenta con un sistema de seguimiento y registro de variables de operación en tiempo real se facilita enormemente esta tarea. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante la implantación de control estadístico de procesos en un sistema de endulzamiento de gas amargo, a partir de la definición de variables críticas, análisis estadístico y evaluación de sus

límites (de control y especificados) que permitan, con las herramientas informáticas adecuadas,¹ su implantación en tiempo real. Cabe mencionar que el control estadístico de procesos es un proceso de mejora continua por lo cual los resultados aquí obtenidos son el punto de partida para implementar el control estadístico de procesos y debe ser reevaluado para verificar si se están obteniendo los resultados esperados. Tras la evaluación, de ser necesario, se deben realizar los ajustes necesarios.

ABSTRACT

Statistical process control is a tool that allows the responsible team to keep a production process within acceptable limits, to make products that meet the required specifications, and that can even reduce production costs. However, the implementation of statistical process control requires the definition of the input and output critical variables, known as key operating parameters and key process indicators, with the first variable to be controlled to meet the specifications of the latter. The process of defining critical variables involves the application of tools and methodologies which must be given by a team made up of a working methodology leader and specialists in the process being analyzed. Core of statistical process control is the statistical analysis of the critical variables, which requires sufficient and reliable information on the variables in question, and should be taken for periods of time in which the process is stable and exhibited normal behavior. If the plant has a system for monitoring and recording of variables in real time operation this task is greatly facilitated. This paper presents the results obtained by implementing statistical process control in a sour gas sweetening system, from the definition of critical variables, statistical analysis and evaluation of its control and specified limits to allow, with appropriate tools, its implementation in real time. It is noteworthy that the statistical process control is a process of continuous improvement, so the results obtained here are the starting point for implementing statistical process control and should be reevaluated to see if they are getting the expected results. After evaluation, if necessary, adjustments should be made.

Palabras clave: Control estadístico de procesos, endulzamiento de gas

Keywords: Statistical process control, sour gas sweetening

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia

(Recibido: Septiembre 14, 2011,

Aceptado: Octubre 13, 2011)

¹ En el proceso analizado, se cuenta con el *PI ProcessBook*®.

INTRODUCCIÓN

El control estadístico de procesos (CEP) es una herramienta estadística que se utiliza para conseguir que un proceso proporcione un producto que cumpla con las especificaciones requeridas por el cliente (Chico-Morales, 1991; Vázquez-Martínez y col., 1998). Cualquier proceso, independientemente de lo bien diseñado que esté y lo cuidadoso que se sea para operarlo y controlarlo, siempre contará con cierta variabilidad inherente o natural, que no se puede evitar. Este “ruido de fondo” es el efecto acumulado de muchas pequeñas causas esencialmente incontrolables. Cuando dicho “ruido de fondo” es relativamente pequeño, se considera aceptable y se dice que la variabilidad natural es originada por un ‘sistema estable de causas de aleatorias’. Un proceso sobre el que sólo actúan causas aleatorias se dice que está bajo control estadístico.

Por el contrario, existen otras causas de variabilidad que pueden estar, ocasionalmente, presentes y que actuarán sobre el proceso. Estas causas proceden principalmente de las siguientes fuentes:

- Métodos imprecisos.
- Ajuste inadecuado de las máquinas.
- Errores de las personas que manejan las máquinas.
- Materia prima defectuosa y variaciones en los materiales empleados.
- Variaciones en el medio ambiente en que se desarrolla el proceso.
- Inexactitud de los sistemas de medición.

La variabilidad producida por estas causas generalmente es grande en comparación con el “ruido de fondo” y habitualmente sitúa al proceso en un nivel inaceptable de funcionamiento. Estas causas son conocidas como “*causas asignables*” y un proceso funcionando bajo dichas causas está fuera de control.

Un objetivo fundamental del CEP es detectar rápidamente la presencia de “*causas asignables*” para emprender acciones correctivas que eviten la elaboración de productos defectuosos.

Alcanzar un estado de control estadístico de proceso requiere un gran esfuerzo pero es sólo el primer paso. Una vez alcanzado, se puede utilizar la información proporcionada por dicho control como base para estudiar el efecto de cambios planificados en el proceso de producción con el objetivo de mejorar la calidad del mismo.

GENERALIDADES DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

Un axioma fundamental en un proceso productivo establece que éste nunca estará en estado estable; es decir, siempre habrá una variabilidad, la cual puede ser ligera. Esto se debe a que el proceso está sujeto a la influencia de diversos factores; muchos de los cuales no se pueden controlar y, por lo tanto, habrá variabilidad tanto en el proceso como en su resultado final. La variabilidad antes mencionada es debida principalmente a los siguientes factores (conocidos como las 6 M):

- Materia prima
- Métodos de producción
- Mano de obra
- Máquinas
- Medio ambiente
- Medición

Para fines prácticos, se suele clasificar a las causas de la variabilidad en causas asignables y causas no asignables. Se dice que una fuente de variabilidad tiene causas asignables cuando se pueden determinar factores que actúan en determinado momento y que dan origen a la variabilidad, tienen efectos predecibles y definidos, y son eliminados cuando se elimina la causa. Por otro lado, se dice que un proceso no tiene causas asignables cuando los efectos asociados son pequeños y difíciles de eliminar dando origen a una variabilidad estable y predecible.

Un intento por controlar la variabilidad de un proceso aplica técnicas y herramientas estadísticas que dan origen al llamado control estadístico de procesos (CEP) y, en esencia, consiste en evaluar el proceso y descubrir mediante sus tendencias si la variabilidad del proceso es “natural” o debida a causas no asignables o, si por el contrario, su variabilidad se debe a causas asignables, las cuales hay que corregir. Si la variabilidad se debe a causas no asignables se dice que el proceso está bajo control estadístico y está fuera de control estadístico en caso contrario.

El control estadístico de procesos puede ser aplicado a cualquier proceso. Sus principales herramientas son (Montgomery, 2005):

1. Histogramas.
2. Listas de verificación.
3. Diagrama de Pareto.
4. Diagrama de causa y efecto.
5. Diagrama de concentración de defectos.
6. Diagramas de puntos.
7. Gráficos de control.

La implementación del control estadístico de proceso en el sistema de endulzamiento estudiado se realizó mediante los siguientes pasos:

1. Definición de variables críticas.
 - a. Parámetros clave de operación (*KOP*, por sus siglas en inglés)
 - b. Indicadores clave del proceso (*KPI*, por sus siglas en inglés)
2. Análisis estadístico de las *KOP* y *KPI*
3. Análisis de la capacidad del proceso.
4. Establecimiento de planes de control e implementación del control estadístico de procesos en línea.

A continuación se describe cada una de estas etapas.

Determinación de las variables críticas del proceso (*KPI* y *KOP*)

La “*Determinación de las variables críticas del proceso (KPI y KOP)*” se realiza aplicando algunas de las herramientas de control estadístico de procesos mencionadas en la sección anterior. El control estadístico de procesos incluye varias etapas en su desarrollo e implementación que aseguran que los datos que se están analizando permitirán mantener bajo control el proceso productivo. La metodología aplicada permite reducir el número de variables que se requieren analizar ya que de todo el universo de variables con que consta cualquier proceso se obtienen una cuantas variables críticas, la cuales ayudarán a mantener al resto del proceso dentro de las condiciones esperadas de operación.

El primer paso consistió en identificar todas las variables que conforman el proceso, mediante el desarrollo del mapa denominado de los “50 mil pies” (sistema inglés) y el llamado *SIPOC*. Este mapa es un diagrama del proceso que identifica sus partes clave. Como su nombre lo indica, es un mapa con una perspectiva del proceso a una altura de “50 mil pies”; es decir, un panorama general del proceso. De éste se deriva el *SIPOC* y el mapa de proceso.

La palabra *SIPOC* se refiere a los elementos que conforman al mapa, que son los siguientes:

S – *Suppliers* (proveedores)
 I – *Inputs* (entradas)
 P – *Process* (proceso)
 O – *Outputs* (salidas)
 C – *Customers* (clientes)

SIPOC es un mapa de alto nivel, con una perspectiva del proceso más cercana que el mapa de “50 mil pies” (Pande y col., 2000; Rath y Strong, 2001). Da, además, una panorámica del proceso y sirve para identificarlo (McCarty y Daniels, 2004):

- Principales pasos
- Entradas y salidas
- Participantes clave del proceso:
 - Proveedores (*suppliers*)
 - Clientes (*customers*)

Una vez concluido el mapa de los “50 mil pies” y el diagrama de *SIPOC*, se cuenta con todas las variables que intervienen en el proceso. El siguiente paso es elaborar el mapeo del proceso, el cual es una ilustración gráfica del proceso a detalle, que incluye todos y cada uno de los pasos que componen al proceso. El mapeo de procesos permite tener una visión sistémica del proceso, así como eliminar las actividades obsoletas y los retrabajos. Por definición, el mapeo ayuda a identificar los pasos del proceso que agregan valor y aquéllos que no lo hacen, las variables de entrada (X) y de salida (Y), y las necesidades en cuanto a instrumentación y medición de variables.

Para elaborar el mapa se requiere considerar: manuales de operación y especificaciones; las 6 M; tormenta de ideas y la experiencia del personal que conoce el proceso.

Pasos para elaborar el mapeo de procesos

1. Identificar el proceso, las entradas externas y las salidas del cliente
 - Elaborar el mapa de los “50 mil pies” y/o el *SIPOC*
 - Identificar las X externas
 - Información de entrada
 - Materiales entrando al proceso
 - Personal involucrado en el proceso
 - Identificar los requisitos del cliente (salidas o Y)
2. Identificar los pasos del proceso
 - Los pasos que agregan y no agregan valor
 - Puntos de inspección o prueba, de reproceso
3. Listar las variables de salida de cada paso
4. Listar y clasificar las variables de entrada en cada paso. Clasificar las variables X como controladas y no controladas:
 - Controladas: Pueden ser “manipuladas” y ver su efecto en las Y (variables de salida)
 - No controladas: Impactan a las Y pero es difícil o imposible controlarlas. Ejemplo: humedad ambiental

- X críticas preliminares: Variables de entrada que estadísticamente muestran alto impacto en la variabilidad de las Y
- 5. Incluir las especificaciones y objetivos de las X. Pueden incluirse las especificaciones y objetivo de las X identificadas como críticas (serán parte del plan de control)

Una vez concluida la identificación de variables críticas preliminares, éstas se agrupan por etapa del proceso, lo que permite evaluar estadísticamente su criticidad mediante el estudio de multi-variables. La matriz compara entradas (X) con salidas (Y) usando el mapa de proceso como principal fuente de información (McCarty y Daniels, 2004).

Los pasos para elaborar la matriz son:

- a) Anotar las Y provenientes del mapa.
- b) Calificar las Y según la importancia que tienen para el cliente.
- c) Enlistar las X por pasos del proceso partiendo del mapa.
- d) Calificar la relación entre cada X y cada Y.
- e) Para cada X, multiplicar los valores de la relación con los valores de importancia de cada Y y sumarlos.

Una vez realizada la ponderación de las variables de acuerdo con su importancia para el cliente hay que ordenar los datos en forma descendente y trazar un diagrama de Pareto con los datos. Las variables que resulten con mayor ponderación serán las variables críticas para este proceso. De acuerdo con el principio de Pareto, se consideran como críticas aquellas variables que constituyen el 80% de la variación del proceso.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS KOP Y KPI

Para realizar el análisis estadístico hay que considerar algunas características que deben cumplir los datos para que puedan ser examinados. El primer punto a considerar es que el periodo de tiempo que se toma para el estudio debe ser un periodo de operación estable. Para ello, debe analizarse la estabilidad y la normalidad de los datos.

Debido a que la naturaleza de los datos es de tipo variable e individual, se verificó la estabilidad del proceso mediante una gráfica de rangos móviles individuales o *I-MR*, por sus siglas en inglés. Con la ayuda de esta gráfica se puede corroborar que no existan patrones o tendencias que hagan evidente que los datos no pertenecen a un solo proceso o población.

La normalidad de los datos puede evaluarse por tres métodos diferentes:

- 1) Histograma: ¿La distribución forma la figura de la campana?
- 2) Valor p de pruebas estadísticas: ¿El valor p es > 0.05?
- 3) Gráfica de normalidad: ¿Los datos forman una línea recta?

Habría normalidad si la respuesta a las preguntas es “Sí”. En caso contrario es necesario tomar otro periodo de tiempo y verificar su normalidad o en su defecto modificar las condiciones de operación para alcanzar un proceso que cumpla con dichos criterios.

Otro criterio que se evaluó para asegurar la confiabilidad de los datos, es la certidumbre de la medición. Si las variaciones en el proceso son debidas principalmente a errores en la medición de las variables, el análisis estadístico no arrojará resultados confiables. La principal herramienta para determinar el error de medición es el análisis RyR (Análisis de repetibilidad y reproducibilidad), ya que estos dos aspectos involucran tanto la variación entre muestras como entre lecturas de una misma muestra. La precisión o repetibilidad indica qué tan repetibles son las mediciones y está directamente relacionado con la desviación estándar de las mediciones. La exactitud es la diferencia entre el promedio de las mediciones del instrumento de medición contra un objetivo (patrón o valor verdadero). Es decir, corrobora si existe la capacidad de reproducir valores considerados como verdaderos. La variabilidad se determina con los estudios “RyR”.

Ya que se cuenta con datos de un proceso en estado estable, es factible iniciar el análisis estadístico de las variables. Con la finalidad de reducir la cantidad de variables críticas, se determina si existe relación significativa entre ellas mediante la correlación, que es una herramienta estadística que indica la intensidad (fuerza) de la relación entre dos variables (Chatterjee y Hadi, 2006). Estadísticamente existen dos métodos para determinar la correlación entre dos variables: el coeficiente de correlación y la regresión.

El coeficiente de correlación sirve para determinar si existe relación entre dos variables, sea lineal o no lineal.

La intensidad de la relación entre las variables se establece de la siguiente forma (Chatterjee y Hadi, 2006):

- $r = -1$: Relación negativa perfecta
- $r = 0$: no hay correlación
- $r = +1$: Relación positiva perfecta
- Si $r > 0.80$ o < -0.80 hay correlación significativa
- Si r está entre -0.80 y 0.80 no hay correlación

Otra herramienta que permite determinar si existe relación entre variables, es la regresión, que describe gráficamente la relación entre 2 variables una recta ajustada que representa dicha relación. Esta recta obedece a una predicción o modelo de la forma $y=f(x)$. La ecuación del modelo se verifica estadísticamente con la calidad del ajuste estimando el coeficiente de determinación (R^2), el cual es una medida de la variación de la salida que es explicada por el modelo de regresión.

Existe una condición en la regresión para que ésta pueda considerarse como válida: los residuales deben tener una conducta normal, estable, sin problemas de variabilidad. En otras palabras, los residuales deben estar en control. Los residuales “anormales” o *outliers* deben investigarse, debido a que su valor puede ser resultado de diversas causas que incluyen errores de mediciones, datos incorrectos, desbalances del proceso, etc.

Si un *outlier* es un dato incorrecto o resultado de una condición especial, la estimación puede ser errónea aumentando el error. Si es real, no debe eliminarse porque puede ser útil para el historial del proceso; antes bien, debe dársele seguimiento.

Una herramienta esencial para el seguimiento de las variables críticas es la autocorrelación, ya que permite identificar cada cuánto tiempo es significativo el registro de datos de las variables críticas. La auto-correlación es una medida de la dependencia entre datos tomados en una secuencia de tiempo (Broersen, 2006). Es muy probable que los datos tomados en frecuencias de tiempo muy cortas se parezcan mucho. La influencia de causas especiales de variación tiende a persistir un periodo de tiempo mayor al intervalo de muestreo. Si hay este tipo de correlación, los datos no suministran información independiente.

La auto-correlación de los datos puede “falsear” las decisiones acerca del comportamiento de las gráficas de control que necesitan independencia entre datos. Puede concluirse que una gráfica está fuera de control cuando no lo está. Esto es una falsa alarma y puede causar más variación debido a un sobrecontrol operacional. Lo que puede hacerse es reducir la frecuencia de muestreo para asegurarse de que los datos tomados son independientes entre sí.

Para corroborar que las variables críticas son significativas para el desempeño del proceso, se lleva a cabo un estudio de multi-variables, que permite verificar la relación que existe entre las variables de entrada y las de salida. Consta de los siguientes pasos (Holmes, 1997):

Fase 1° Planeación:

- Definir el objetivo del estudio
- Identificar entradas y salidas
- Determinar los tiempos de muestreo

Fase 2° Estudio de capacidad de la salida:

- Definir la Y
 - Estudiar su estabilidad, forma, variabilidad y centrado
 - Determinar la capacidad a corto plazo
 - Tomar acción en función de los 2 puntos anteriores

Fase 3° Ejecución y análisis del estudio:

- Evaluar las relaciones X -vs- Y
 - Evaluar los efectos de los ruidos y las variables controladas en la salida
 - Caracterizar el efecto de los ruidos en el proceso
 - Analizar las relaciones entre las entradas controladas y las salidas

Este estudio permite determinar si las variables de entrada realmente impactan en las salidas (Härdle y Simar, 2007; Kachigan, 1991; Qin, 1998), ya que para aplicar el control estadístico sólo deben considerarse aquellas variables de entrada que impactan en las salidas.

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO

La capacidad del proceso representa el desempeño del mismo siempre y cuando éste se encuentre dentro de control estadístico. La capacidad del proceso es una medida de la variabilidad total del proceso siempre y cuando dicha variabilidad se deba a causas no asignables. La dispersión del proceso 6σ generalmente se toma como una medida de la capacidad, ya que el 99.74% de todos los productos o medidas observadas se encuentran dentro de ese margen (Montgomery, 2005).

Índices de capacidad del proceso

Estos índices relacionan la dispersión del proceso con la dispersión especificada de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

siendo USL y LSL los límites superior e inferior especificados, respectivamente. Como se puede observar si el $C_p > 1$ entonces el proceso es capaz de cumplir con los requerimientos. Sin embargo, la principal suposición del C_p es que considera la media del proceso ubicada exactamente entre el USL y el

LSL, esta suposición no es una buena medida ya que en la práctica la media puede estar tendida hacia alguno de los límites. Visto de otra forma el C_P representa el potencial de proceso (Montgomery, 2005). Para considerar esta situación se tienen los índices superior e inferior de capacidad (C_{PU} y C_{PL}), los cuales se definen de la siguiente forma:

$$C_{PU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad (2)$$

$$C_{PL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (3)$$

Debido a lo anterior es conveniente definir un nuevo índice que tome en cuenta la media del proceso. Este nuevo índice se define a partir del C_{PU} y el C_{PL} , los cuales consideran la media del proceso. Este índice es conocido como C_{PK} y se define de la siguiente forma (Montgomery, 2005):

$$C_{PK} = \min(C_{PU}, C_{PL}) \quad (4)$$

Ahora bien de acuerdo con las ecuaciones (1) y (4) se tiene si $C_P = C_{PK}$ entonces el proceso está centrado respecto a sus especificaciones, mientras que si $C_{PK} < C_P$ la media del proceso tiende hacia algunos de los límites especificados.

El C_{PK} es útil para determinar si el proceso está dentro de los límites de control estadístico, es decir, si los métodos, máquinas, materiales, herramientas y mano de obra, están operando de acuerdo con las necesidades del cliente.

ESTABLECIMIENTO DE PLANES DE CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS EN TIEMPO REAL

La necesidad de tener un plan de control es asegurar que consistentemente se controla el proceso y consecuentemente se cumplen los requisitos del cliente. Una vez identificadas las variables, se requiere el desarrollo de un plan de control que permita lograr los objetivos del control estadístico de procesos; donde se establezcan los planes de acción para asegurar la implementación del CEP y que las *KOP* y *KPI*, resultado del análisis estadístico sean evaluadas y que éstas se incluyan en los procedimientos operativos.

Los pasos simplificados para elaborar un plan de control son (Melo-González y col., 2010):

1. Conjuntar la documentación analizada con

- Mapas, matriz causa-efecto, FMEA, capacidad de proceso, estudios estadísticos
 - Condiciones de operación y experiencia del personal
2. Formar equipos para actualizar la documentación (sentido de pertenencia)
 3. Diseñar y llenar el plan de control (en la siguiente lámina se presenta un ejemplo)
 4. Entrenar o re-entrenar al personal y asignar responsabilidades
 5. Verificar que se cumplan los requisitos de operación y del cliente
 6. Documentar el compromiso (firmas)
 7. Verificar la efectividad del plan de control (ayuda de la capacidad de proceso)

Estos pasos permitirán analizar, decidir y tomar acción para asegurar que se cumplan las necesidades de los clientes. Una vez definidas las variables críticas se procede a realizar su análisis estadístico para determinar la correlación existente entre las variables críticas de entrada (*KOP*) y las variables críticas de salida (*KPI*) para determinar cuáles son las *KOP* que mayor impacto tienen sobre las *KPI*.

Finalmente, una vez establecidas las variables críticas definitivas, sus correlaciones y límites superiores e inferiores requeridos, se puede implementar preferentemente en línea si es que el proceso cuenta con seguimiento en tiempo real de las variables involucradas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del CEP en el sistema de endulzamiento estudiado se apegó al procedimiento general presentado en la sección anterior y se realizó con el apoyo de la opinión de expertos, para lo cual fue necesario conformar un equipo natural de trabajo (ENT) y llevar a cabo diversas reuniones de trabajo.

En primer lugar, se realizó el diagrama de bloques mostrado en la Figura 1 con la finalidad de representar las diversas unidades funcionales del sistema para facilitar la identificación de las variables críticas. Este diagrama representa una vista a “50 mil pies” del proceso.

Para simplificar el análisis se dividió el sistema de endulzamiento en dos subsistemas: absorción y regeneración de amina.

Partiendo del diagrama de bloques, el ENT generó los *SIPOC* de cada uno de los subsistemas. Dichos *SIPOC* se presentan en la Figura 2.

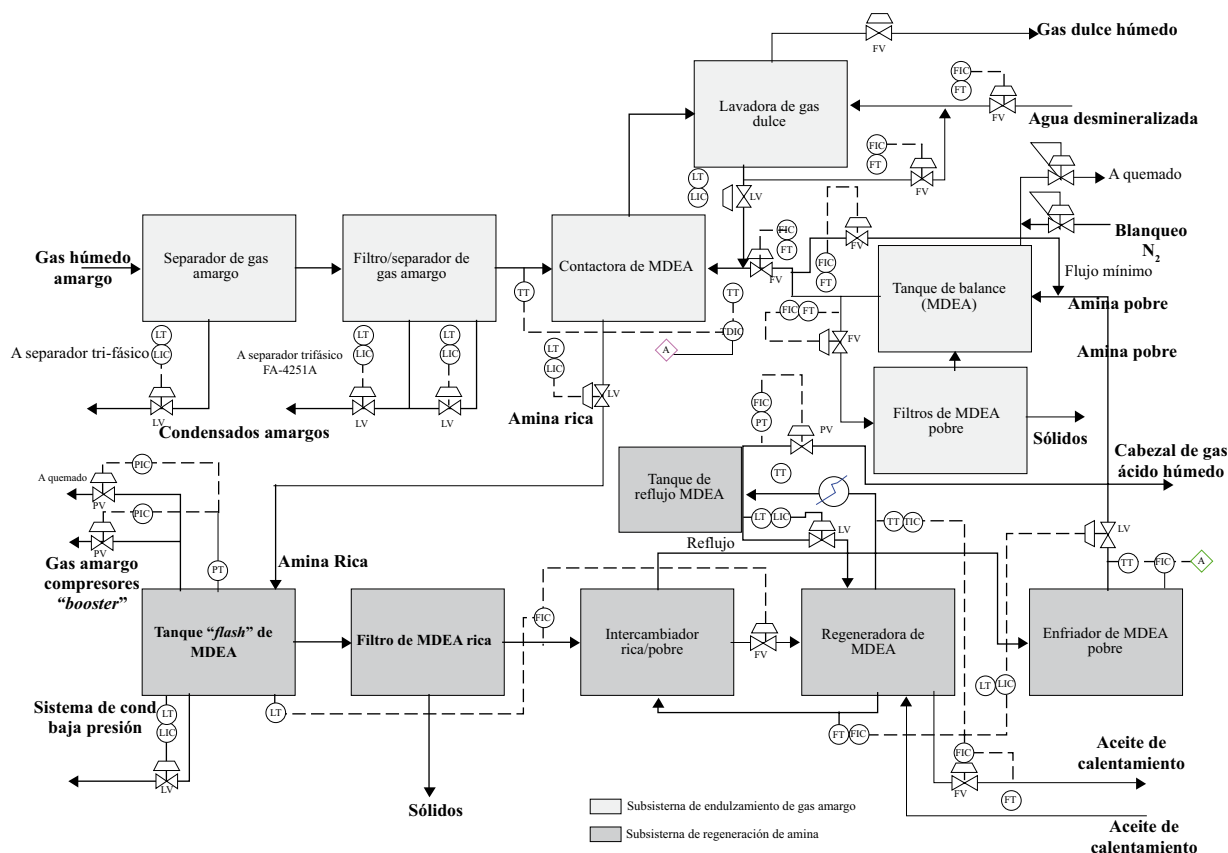
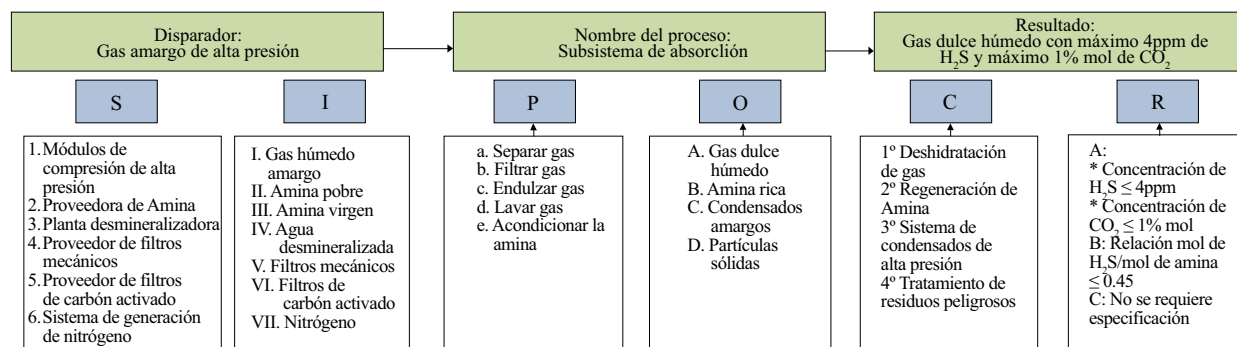
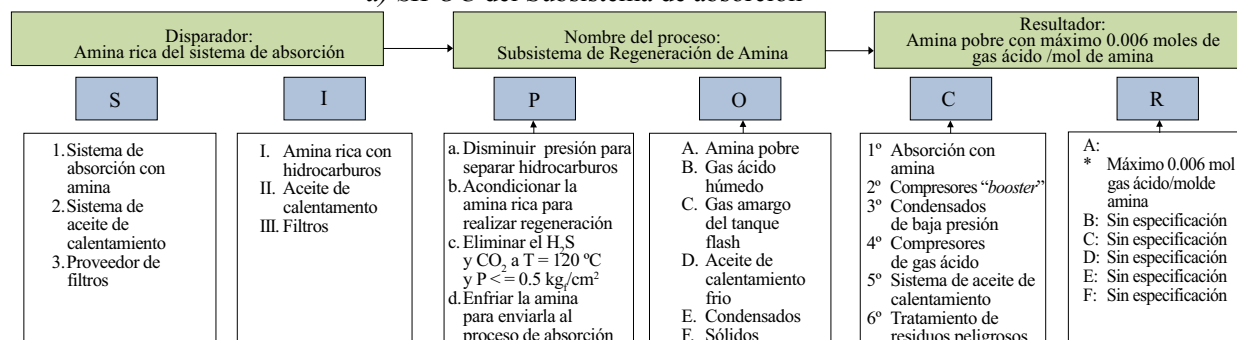


Figura 1. Diagrama de bloques funcionales del sistema de endulzamiento (MDEA, Mono o dietanol amina)



a) SIPOC del Subsistema de absorción



b) SIPOC del Subsistema de regeneración de amina

Figura 2. SIPOC del sistema de endulzamiento (S=Suppliers, I=Inputs, P=Process, O=Outputs, C=Customers, R=Requirements)

Continuando con el procedimiento general, se elaboraron los diagramas de entradas y salidas para cada uno de los subsistemas, ver Figura 3.

Posteriormente, se establecieron las matrices causa y efecto para los dos subsistemas, con la finalidad de definir las variables críticas preliminares de dichos subsistemas. Cabe mencionar que se verificó la estabilidad y normalidad de las variables empleando el software Minitab® (ver Figuras 8 a 13). Por otro lado, las matrices causa y efecto se presentan a continuación en las Figuras 4 y 5.

Una vez definidas las variables críticas preliminares, mostradas en la Tabla 1, el siguiente paso consistió en el análisis estadístico de dichas variables para determinar la correlación existente entre las variables críticas de entrada (*KOP*) y las variables críticas de salida (*KPI*) y establecer las *KOP* más importantes y, en algunos casos, reducirlas. Los datos de las variables críticas fueron tomados de los registros históricos del sistema de endulzamiento y se realizó con el apoyo del paquete estadístico Minitab.

Tabla 1

Variables críticas preliminares para el sistema de endulzamiento de gas amargo

<i>a. Subsistema de endulzamiento</i>	
<i>Variables críticas de entrada</i>	<i>Variables críticas de salida</i>
1. Flujo de amina pobre a torre contactora 2. Concentración de amina pobre 3. Flujo de gas húmedo amargo 4. Concentración de H ₂ S en la amina pobre 5. Concentración de CO ₂ en la amina pobre 6. Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo 7. Composición del gas húmedo amargo	1. Concentración de H ₂ S en el gas dulce húmedo 2. Concentración de CO ₂ en el gas dulce húmedo 3. Carga ácida en amina rica
<i>b. Subsistema de regeneración de amina</i>	
<i>Variables críticas de entrada</i>	<i>Variables críticas de salida</i>
1. Presión en el domo de la regeneradora 2. Flujo de aceite de calentamiento 3. Temperatura del aceite de calentamiento 4. Temperatura en el domo de la regeneradora 5. Concentración de H ₂ S y CO ₂ de la amina rica con hidrocarburos 6. Reflujo 7. Flujo de amina rica con sólidos menores a 5 micras 8. Flujo de amina pobre caliente	1. Concentración de H ₂ S en el gas dulce húmedo 2. Concentración de CO ₂ en el gas dulce húmedo 3. Carga ácida en amina rica

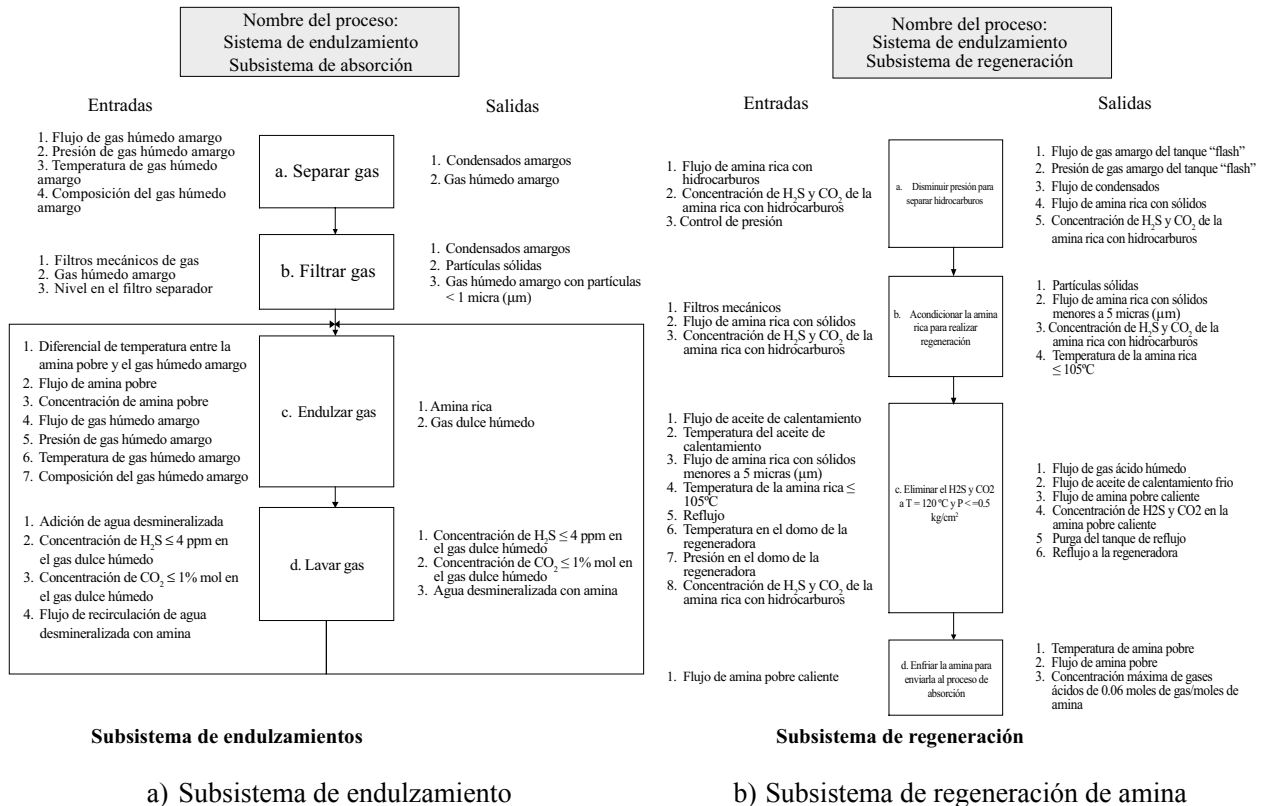


Figura 3. Diagramas de entradas y salidas o mapeo del proceso del sistema de endulzamiento

Subsistema de absorción

De acuerdo con la matriz de causa y efecto (Figura 4) y la Tabla 1, el subsistema tiene tres variables críticas de salida o indicadores clave de proceso, *KPI*, por sus siglas en inglés:

1. Concentración de H_2S en el gas dulce húmedo
2. Concentración de CO_2 en el gas dulce húmedo
3. Carga ácida en amina rica

y ocho variables críticas de entrada o parámetros clave de operación, *KOP*, por sus siglas en inglés:

1. Flujo de amina pobre
2. Flujo de gas húmedo amargo
3. Concentración de amina pobre
4. Concentración de H_2S en la amina pobre
5. Concentración de CO_2 en la amina pobre

6. Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo
7. Adición de agua desmineralizada
8. Composición del gas húmedo amargo

Sin embargo, el flujo de amina pobre y el flujo de gas húmedo amargo operacionalmente están relacionados, ya que se ajusta el flujo de amina pobre en función de la carga de gas húmedo que manejará la planta, por lo cual estas variables pueden manejarse como una sola variable crítica definida como:

- Relación de flujo gas-amina

Por otro lado, la carga ácida en la amina rica es un parámetro que no se controla, dado que la esencia del proceso es remover con la amina los gases ácidos de la corriente de gas amargo. Por esta razón se excluyó esta

Calificación importancia para cliente			1	8	1	10	9					
			1	2	3	4	5					
Entradas	Requisitos salidas		Condensados amargos	Amina rica	Partículas sólidas	Concentración de H ₂ S ≤ 4 ppm en el Gas dulce húmedo	Concentración de CO ₂ ≤ 1% mol en el Gas dulce húmedo				Total	Parciales
Paso del proceso	Entrada del proceso											
1	c. Endulzar gas	2. Flujo de amina pobre	0	9	0	9	9				243	0.12
2	c. Endulzar gas	3. Concentración de amina pobre	0	9	0	9	9				243	0.23
3	c. Endulzar gas	4. Flujo de gas húmedo amargo	0	9	0	9	9				243	0.35
4	e. Acondicionar amina	1. Concentración ≤ 0.01 ppm de H ₂ S en la amina pobre	0	9	0	9	9				243	0.47
5	e. Acondicionar amina	1. Concentración de xx% mol de CO ₂ en la amina pobre	0	0	0	9	9				243	0.58
6	c. Endulzar gas	1. Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo	9	0	0	9	9				180	0.67
7	d. Lavar gas	1. Adición de agua desmineralizada	0	3	0	9	9				171	0.75
8	c. Endulzar gas	7. Composición del gas húmedo amargo	0	0	0	9	3				141	0.82
9	c. Endulzar gas	6. Temperatura de gas húmedo amargo	9	0	0	3	3				126	0.88
10	e. Acondicionar amina	4. Filtros mecánicos de amina	0	0	9	3	3				66	0.91
11	e. Acondicionar amina	6. Flujo de amina filtrada	0	0	9	3	3				66	0.95
12	e. Acondicionar amina	5. Filtros de carbón activado de amina	0	0	0	1	3				57	0.97
13	e. Acondicionar amina	7. Nitrógeno	0	0	0	0	1				19	0.98
14	b. Filtrar gas	1. Filtros mecánicos de gas	1	0	9	0	0				10	0.99
15	a. Separar gas	1. Flujo de gas húmedo amargo	9	0	0	0	0				9	0.99
16	a. Separar gas	3. Temperatura de gas húmedo amargo	9	0	0	0	0				9	1.00
17	b. Filtrar gas	2. Gas húmedo amargo	3	0	3	0	0				6	1.00
18	a. Separar gas	4. Composición del gas húmedo amargo	3	0	0	0	0				3	1.00
19	a. Separar gas	2. Presión de gas húmedo amargo	0	0	0	0	0				0	1.00
20	b. Filtrar gas	3. Nivel en el filtro separador	0	0	0	0	0				0	1.00
21	c. Endulzar gas	5. Presión de gas húmedo amargo	0	0	0	0	0				0	1.00
22	d. Lavar gas	2. Concentración de H ₂ S ≤ 4ppm en el gas dulce húmedo	0	0	0	0	0				0	1.00
23	d. Lavar gas	3. Nivel en el filtro separador	0	0	0	0	0				0	1.00
24	d. Lavar gas	4. Flujo de recirculación de agua desmineralizada con amina	0	0	0	0	0				0	1.00
25	e. Acondicionar Amina	3. Flujo de amina recirculada	0	0	0	0	0				0	1.00
26	e. Acondicionar Amina	8. Amina virgen	0	0	0	0	0				0	1.00
Total			37	384	27	910	711	0	0	0	2078	

Figura 4. Matriz causa y efecto del subsistema de absorción

Calificación importancia para cliente		2	5	1	1	4	1	9	5	10			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Entradas	Requisitos salidas	Flujo de gas amargo del tanque flash	Presión de gas amargo del tanque flash	Flujo de condensados	Partículas sólidas	Flujo de gas ácido húmedo	Flujo de aceite de calentamiento frío	Temperatura de amina pobre	Flujo de amina pobre	Concentración de H ₂ S ≤ xx ppm y CO ₂ ≤ xx% mol en amina pobre	Total	Parciales	
Paso del proceso	Entrada del proceso												
13	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Presión en el domo de la regeneradora	0	0	0	0	9	3	3	0	9	156	0.138
7	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Flujo de aceite de calentamiento	0	0	0	0	9	9	0	0	9	135	0.257
8	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Temperatura del aceite de calentamiento	0	0	0	0	9	9	0	0	9	135	0.376
12	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Temperatura en el domo de la regeneradora	0	0	0	0	9	9	0	0	9	135	0.496
14	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Concentración de H ₂ S y CO ₂ de la amina rica con hidrocarburos	0	0	0	0	9	3	0	0	9	129	0.61
11	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Reflujo	0	0	0	0	3	9	0	0	9	111	0.708
9	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Flujo de amina rica con sólidos menores a 5 micras (μm)	0	0	0	0	9	9	0	9	0	90	0.787
16	d. Enfriar la amina para enviarla al proceso de absorción	Flujo de amina pobre caliente	9	9	0	0	0	0	3	9	0	72	0.851
3	a. Disminuir presión para separar hidrocarburos	Control de presión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0.91
15	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Temperatura del reflujo	0	0	0	0	9	1	0	0	0	37	0.94
10	c. Eliminar el H ₂ S y CO ₂ a T= 120°C y P ≤0.5 kg _f /cm ²	Temperatura de la amina rica ≤ 105°C	0	0	0	0	0	3	3	0	0	30	0.97
1	a. Disminuir presión para separar hidrocarburos	Flujo de amina rica con hidrocarburos	3	3	0	0	0	0	0	0	0	21	0.98
4	b. Acondicionar la amina rica para realizar regeneración	Filtros mecánicos	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	0.99
5	b. Acondicionar la amina rica para realizar regeneración	Flujo de amina rica con sólidos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1.00
2	a. Disminuir presión para separar hidrocarburos	Concentración de H ₂ S y CO ₂ de la amina rica con hidrocarburos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00
6	b. Acondicionar la amina rica para realizar regeneración	Concentración de H ₂ S y CO ₂ de la amina rica con hidrocarburos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00
Total			24	60	0	9	252	46	81	90	450	1132	

Figura 5. Matriz causa y efecto del subsistema de regeneración de amina

variable del análisis en este subsistema reduciéndose así una *KPI*; sin embargo, no se dejó sin analizar ya que fue considerada en el subsistema de regeneración de amina como se verá más adelante.

De acuerdo con la información de diseño del sistema, el porcentaje de amina en la MDEA pobre se debe encontrar entre 48 y 54, de forma que si se cumple esta condición la variable no será crítica.

Como se puede observar en la Figura 6, en el periodo de tiempo analizado, la concentración de amina no presenta una variación muy alta por lo cual en este periodo de tiempo ésta no tendrá un impacto muy alto en la *KPI*.

Otra condición de diseño requiere que el diferencial de temperatura entre el gas amargo y la amina pobre se debe encontrar entre 5 y 15°C. La Figura 7 presenta la variación del diferencial de temperatura en el periodo de tiempo analizado. Como se puede observar, esta variable

prácticamente se ha mantenido dentro de los valores recomendados y, por lo tanto, su análisis estadístico no refleja un impacto importante.

De acuerdo con lo anterior, pueden reducirse las *KOP* a:

1. Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo
2. Concentración de amina pobre
3. Relación de flujo gas-amina
4. Concentración de gases ácidos en la amina pobre
5. Contenido de gases ácidos en el gas húmedo amargo

y las *KPI*:

1. Concentración de H₂S en el gas dulce húmedo
2. Concentración de CO₂ en el gas dulce húmedo

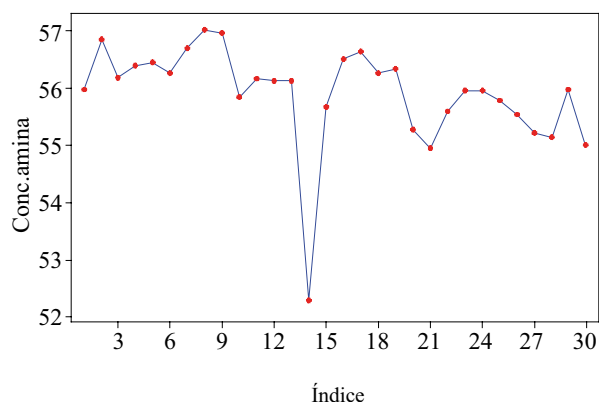


Figura 6. Comportamiento de la concentración de amina en mol gas/mol

La Tabla 2 presenta los resultados de las correlaciones entre las *KOP* y las *KPI*. Como puede observarse, a excepción de la dependencia entre la concentración de H_2S en la corriente de gas húmedo dulce con respecto al diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo, todas las demás correlaciones exhiben un valor de *p* menor a 0.05 lo cual indica que existe correlación entre las variables (Chatterjee y Hadi, 2006). Por otro lado, el valor del coeficiente de correlación de Pearson indica la mayor o menor correlación existente entre dichas variables. El caso de la concentración de H_2S en la corriente de gas húmedo dulce con respecto al diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo puede deberse principalmente a que esta última variable, de acuerdo con la Figura 7, se encuentra dentro de los límites establecidos de acuerdo al diseño, por lo que aparentemente no existe relación entre ellas.

Tabla 2
Correlaciones entre las KOP y las KPI

	Concentración de H_2S		Concentración de CO_2	
	Correlación de Pearson	Valor <i>p</i>	Correlación de Pearson	Valor <i>p</i>
Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo	0.160	0.112	0.313	0.002
Concentración de amina pobre	0.757	0.000	0.397	0.000
Relación de flujo gas-amina	0.443	0.000	0.762	0.000
Contenido de gases ácidos en el gas húmedo amargo	0.415	0.000	0.728	0.000

Una vez verificadas las *KOP* y *KPI* y corroborado que existe relación entre ellas, el siguiente paso

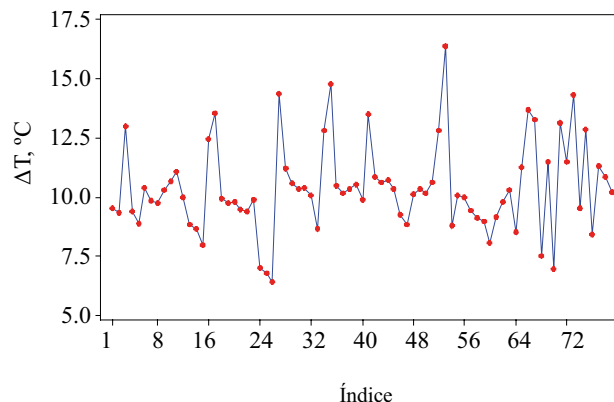


Figura 7. Comportamiento del diferencial de temperatura en °C

consistió en la verificación de la capacidad estadística y la definición de los límites de control estadístico para cada una de las variables críticas. Los límites de control estadístico o límites especificados, ya definidos, se presentan en la Tabla 3. Cabe aclarar que el control estadístico de proceso implica un ciclo de mejora continua, por lo que los límites y variables críticas definidas deberán reevaluarse de acuerdo con los indicadores de desempeño del sistema y los resultados que se obtengan a mediano plazo por la aplicación del control estadístico.

Tabla 3
Límites de control estadístico para las variables críticas

Variable	LSE ¹	LIE ²	Criterio empleado
Diferencial de temperatura entre la amina pobre y el gas húmedo amargo	15°C	5°C	Condición de diseño
Concentración de amina pobre	54%	48%	Condición de diseño
Relación de flujo gas-amina	4.4	3.8	Estimado
Contenido de gases ácidos en el gas húmedo amargo	----	----	Esta variable corresponde a la carga, la cual no se puede controlar; sin embargo, determina como se comportarán las otras variables
Concentración de H_2S en el gas dulce húmedo	2.5	1.5	Fijado por operación para tener margen operativo, dado que la especificación en el gas dulce es hasta 4 ppm
Concentración de CO_2 en el gas dulce húmedo	0.6%	0.3%	Fijado por operación para tener margen operativo, dado que la especificación en el gas dulce es hasta 1% mol

¹LSE. Límite superior especificado (*USL*), por sus siglas en inglés

²LIE. Límite inferior especificado (*LSL*), por sus siglas en inglés

Capacidad del proceso

La Figura 8 presenta las gráficas de comportamiento y la capacidad del proceso para la variable *diferencial de temperatura*, de la cual se puede establecer lo siguiente para el periodo de tiempo analizado:

- Los datos exhiben un comportamiento normal
- A excepción de algunos puntos, se puede decir que la variable está controlada
- Los límites de control para la variable se encuentran entre 5.86 y 14.88°C
- La variable se encuentra dentro de sus límites especificados y tiene un C_{PK} de 1.03; es decir, su dispersión prácticamente ocupa los límites especificados para la variable

Para la concentración de amina pobre (Figura 9), se tiene:

- Los datos exhiben un comportamiento normal
- Se puede decir que la variable está controlada, salvo por un punto fuera de control
- Los límites de control para la variable se encuentran entre 54.3 y 57.6%
- La variable se encuentra arriba de sus límites especificados y tiene un C_{PK} de -1.15, lo cual implica que presenta una buena dispersión y solamente se requiere llevar la variable dentro de los límites especificados

De manera similar, la Figura 10 presenta información relativa a la relación de flujo de gas amargo-amina pobre:

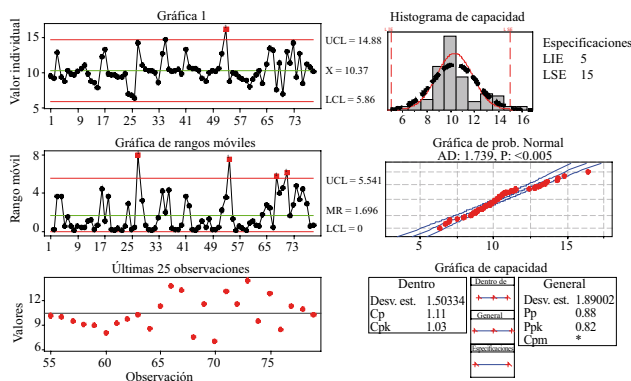


Figura 8. Capacidad del proceso para la variable diferencial de temperatura entre el gas húmedo amargo y la amina pobre

- Los datos exhiben un comportamiento normal
- La variable no está controlada dado que exhibe dos puntos máximos
- Los límites de control para la variable se encuentran entre 3.9 y 4.5
- El límite inferior de control para la variable se encuentra por arriba del límite inferior especificado; sin embargo, el límite superior de control excede el límite superior especificado, por lo que el valor de C_{PK} de la variable es 0.61, lo cual implica que la variable tiene una dispersión mayor a la permitida. Se requiere llevar en primer lugar el valor de C_K a un valor mayor que uno.

La Figura 11 presenta el comportamiento de los gases ácidos en el gas amargo. Cabe mencionar que esta variable no puede ser controlada dado que corresponde a la corriente de alimentación de la planta. Sin embargo, se puede observar que en el periodo de tiempo analizado la concentración de gases ácidos en el gas amargo estuvo entre 3.66 y 4.04% mol.

Para las variables críticas de salida o *KPI* se tienen las gráficas mostradas en las Figuras 12 y 13. En ellas se aprecia:

- Las variables críticas de salida, concentración de H_2S y concentración de CO_2 , no se encuentran dentro de control de acuerdo con los criterios Western Electric (Montgomery, 2005). En ambas variables se aprecian dos regiones, una con una concentración más alta que la otra, y con un comportamiento similar lo cual es de esperarse debido a la naturaleza del proceso. La falta de control es corroborada con los histogramas los cuales presentan máximos locales

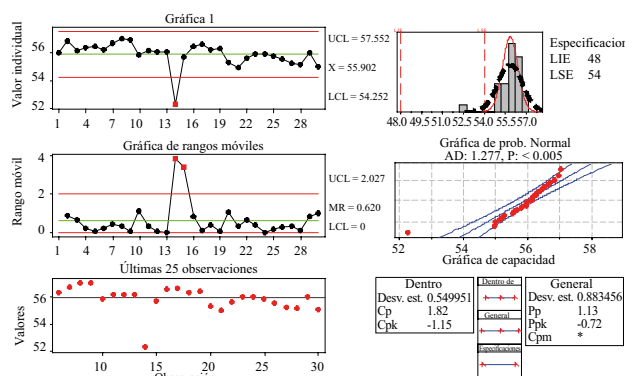


Figura 9. Capacidad del proceso para la variable concentración de amina pobre

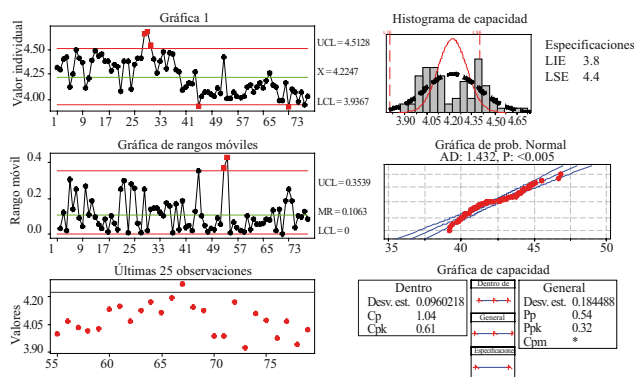


Figura 10. Capacidad del proceso para la variable relación de flujo de gas amargo – amina pobre

- Los límites de control para la concentración de H_2S son 0.37 ppm y 1.01 ppm, mientras que para la concentración de CO_2 son 0.18% mol y 0.38% mol
- Respecto a los C_{PK} se tiene
 - Para la concentración de H_2S el C_K tiene un valor -4.08. El signo negativo implica que éste se encuentra fuera de los límites especificados. En la Figura 12 se aprecia que la variable se ubica por debajo del límite inferior. Una implicación directa de esto radica en el hecho de estar entregando un producto con una calidad mayor a la especificada. El impacto principal de esto radica en los costos asociados de entregar un producto con una calidad mayor. Adicionalmente, si se logra llevar la concentración de H_2S dentro de los límites y se

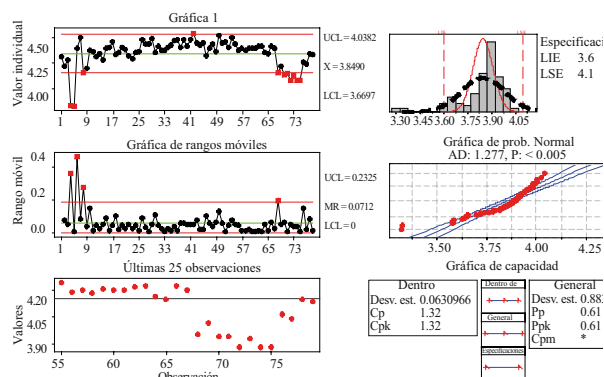


Figura 11. Capacidad del proceso para la variable gases ácidos en el gas húmedo amargo

mantiene la dispersión, la cual va asociada con el C_{PK} , se estaría hablando de que, para esta variable, se manejaría un estándar de calidad por arriba de los parámetros Seis Sigma (Montgomery, 2005).

- Por otro lado, para la concentración de CO_2 , se tiene un C_{PK} de 2.77, lo cual indica que la variable se encuentra dentro de los parámetros especificados y, pese a que la variable no se encuentra controlada de acuerdo con los criterios Western Electric, en este parámetro también se cumple con una calidad por arriba de los parámetros establecidos en la metodología Seis Sigma.

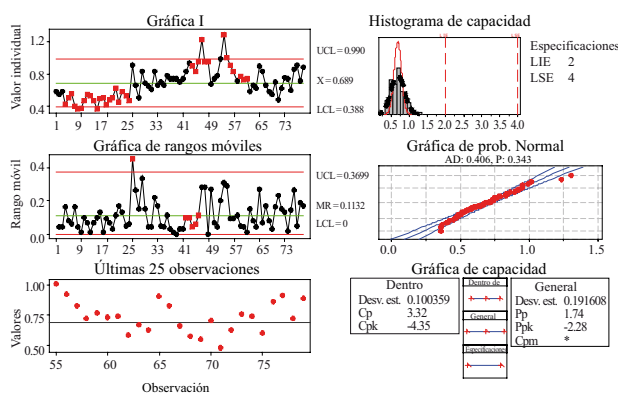


Figura 12. Capacidad del proceso para la variable concentración de H_2S en el gas dulce húmedo

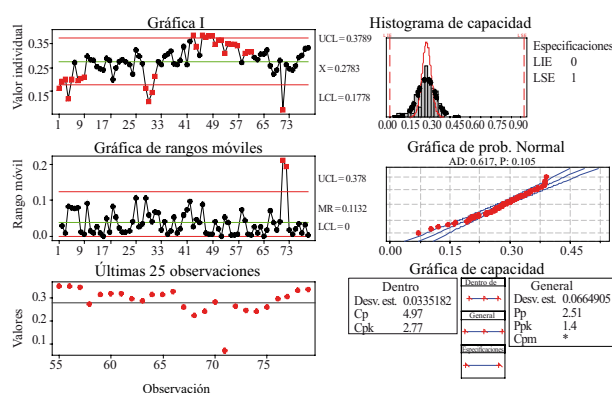


Figura 13. Capacidad del proceso para la variable concentración de CO_2 en el gas dulce húmedo

Subsistema de regeneración de amina

De acuerdo con la matriz de causa y efecto y la Tabla 1b, este subsistema tiene tres variables críticas de salida:

1. Concentración de H_2S en la amina pobre
2. Concentración de CO_2 en la amina pobre
3. Temperatura de la amina pobre

y ocho variables críticas de entrada o parámetros clave de operación, *KOP*:

1. Presión en el domo de la regeneradora
2. Flujo de aceite de calentamiento
3. Temperatura del aceite de calentamiento
4. Temperatura en el domo de la regeneradora
5. Concentración de gases ácidos en la amina rica
6. Razón de reflujo
7. Flujo de amina rica
8. Flujo de amina pobre

Sin embargo, analizando un poco más las variables críticas de salida se concluye que la temperatura de la amina pobre realmente no depende del proceso de regeneración ya que ésta se fija entre 5 y 15°C por arriba de la temperatura del gas amargo que entra al subsistema de absorción y ésta es controlada en un aerofriador que forma parte del subsistema antes mencionado y ya se encuentra considerada dentro del subsistema de endulzamiento.

Por otro lado, para la concentración de CO_2 en la amina pobre, no se contó con datos estadísticos para realizar su análisis, ya que en los análisis de laboratorio disponibles solamente se determina la concentración de H_2S en la corriente de amina pobre. Para fines de análisis sólo se analizó la

Concentración de H_2S en la amina pobre como variable crítica de salida

Por el lado de las variables críticas de entrada o *KOP*, se encontró que no se contaba con datos confiables en la medición del flujo de aceite de calentamiento, por lo que esta variable no se analizó. Por otro lado, el flujo de amina pobre que sale de la regeneradora está relacionada con la relación de reflujo y; además, el flujo de amina pobre es enviado a un tanque de balance, por lo que dicho flujo no es realmente crítico para la operación del sistema.

Finalmente, respecto a la temperatura del aceite de calentamiento, se llegó a la conclusión que la variable realmente crítica no es la temperatura del aceite sino

la temperatura de los fondos de la regeneradora por el efecto negativo que se tiene sobre la amina a temperaturas mayores de 126°C. De acuerdo con lo antes expuesto, las variables críticas de entrada finales son:

1. Presión en el domo de la regeneradora
2. Temperatura de los fondos de la regeneradora
3. Temperatura en el domo de la regeneradora
4. Concentración de gases ácido en la amina rica
5. Razón de reflujo
6. Flujo de amina rica

La Tabla 4 presenta los resultados de las correlaciones entre las *KOP* y la *KPI* para este subsistema. Como puede observarse, la presión en el domo de la regeneradora y la temperatura de los fondos de la regeneradora no parecen tener relación con la concentración de H_2S en la amina pobre; sin embargo, de acuerdo con las Figuras 15 y 16, donde se aprecia el comportamiento de estas variables en el periodo de tiempo analizado, se observa que ambas prácticamente se mantuvieron constantes (0.492 a 0.508 kg_f/cm^2 para la presión en el domo y 119.6 a 120.06°C para la temperatura en los fondos), lo cual incide directamente en el modelo y lleva a determinar que no hay correlación entre las variables, lo cual no necesariamente es cierto.

Tabla 4
Correlaciones entre las KOP y las KPI

	Concentración de H_2S en amina pobre	
	Correlación de Pearson	Valor P
Presión en el domo de la regeneradora	-0.029	0.782
Temperatura de los fondos de la regeneradora	-0.120	0.256
Temperatura en el domo de la regeneradora	0.218	0.038
Concentración de gases ácidos en la amina rica	0.508	0.000
Razón de reflujo	0.215	0.041
Flujo de amina rica	0.051	0.631

Por otro lado, si bien el coeficiente de correlación para la temperatura en el domo de la regeneradora, la concentración de gases ácidos en la amina rica y la razón de reflujo es inferior a 0.7, el valor p en todas ellas es inferior a 0.05, lo cual lleva a aceptar la hipótesis de correlación entre ellas y la concentración de H_2S en la amina pobre. Finalmente, el flujo de amina rica no parece tener un efecto importante sobre la concentración de H_2S en la corriente de amina pobre. El análisis estadístico de las variables críticas de este subsistema es similar al realizado para el subsistema de absorción, por lo que a continuación solamente se presentan las gráficas correspondientes a dichas variables críticas.

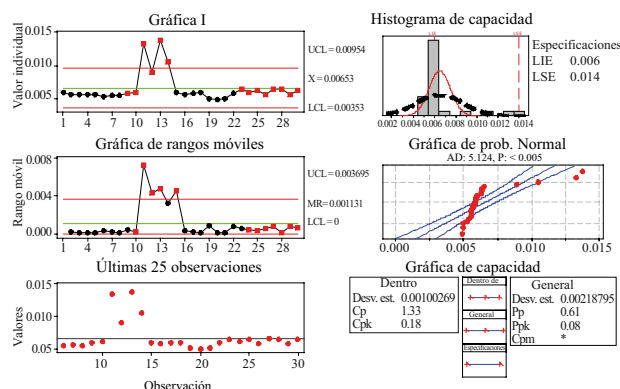


Figura 14. Capacidad del proceso para la variable concentración de H_2S en amina pobre

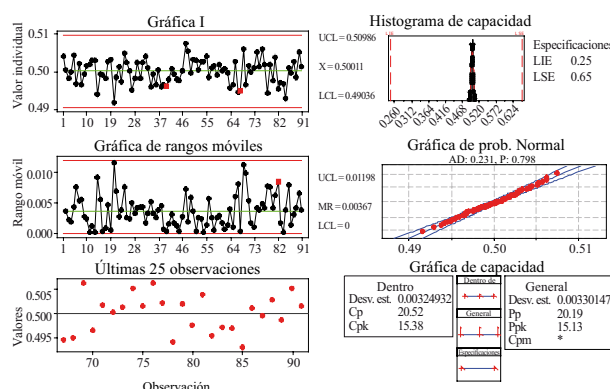


Figura 15. Capacidad del proceso para la variable presión en el domo de la regeneradora

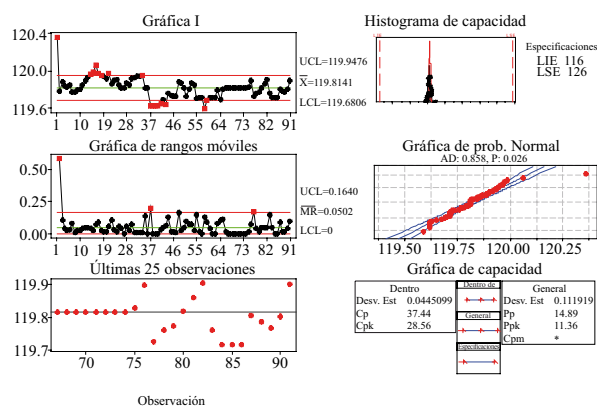


Figura 16. Capacidad del proceso para la variable temperatura de fondos de la regeneradora

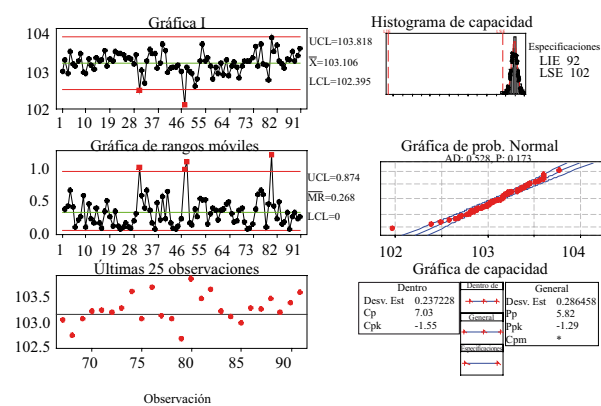


Figura 17. Capacidad del proceso para la variable temperatura en el domo de la regeneradora

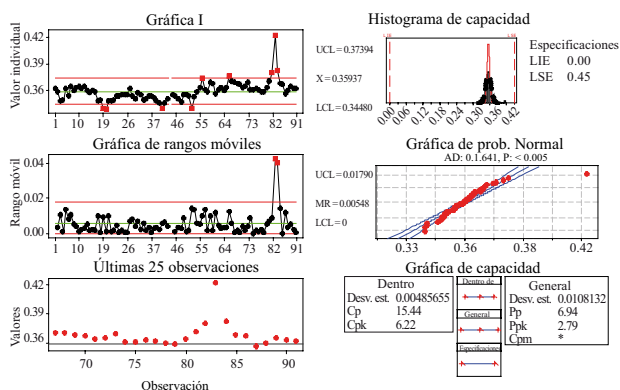


Figura 18. Capacidad del proceso para la variable concentración de gases ácidos en la amina rica

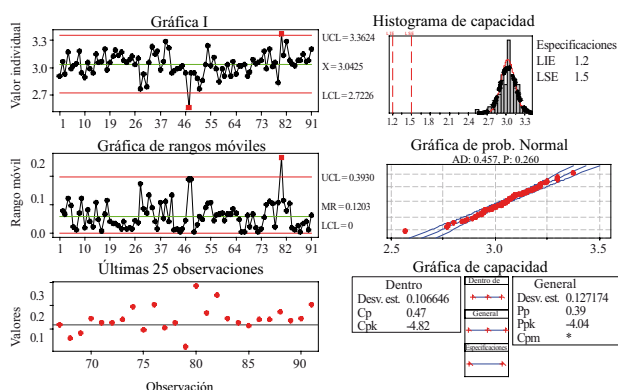


Figura 19. Capacidad del proceso para la variable relación de reflujo en la regeneradora

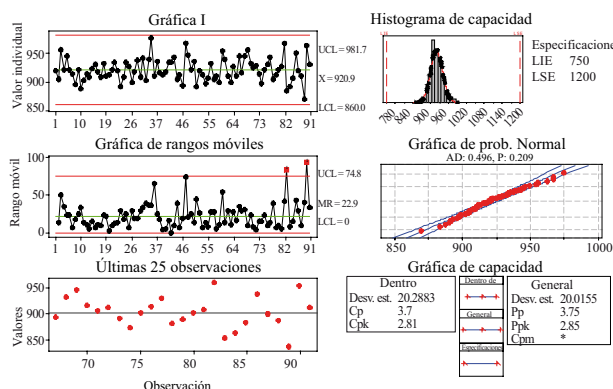


Figura 20. Capacidad del proceso para la variable flujo de amina rica

En la Tabla 5 se presentan los límites especificados para las variables críticas del subsistema de regeneración de amina.

Tabla 5

Límites especificados para las variables críticas del subsistema de regeneración de amina

Variable	LSE ¹	LIE ²	Criterio empleado
Concentración de H ₂ S en la amina pobre ³	0.014	0.006	Mol gases ácidos/mol de amina Condición de diseño
Presión en el domo de la regeneradora, kg _f /cm ²	0.65	0.25	Condición de diseño
Temperatura de los fondos de la regeneradora, °C	126	116	Condición de diseño, para el caso del LSE condición para evitar degradación de amina
Temperatura en el domo de la regeneradora, °C	101	92	Condición de diseño
Concentración de gases ácidos en la amina rica, % mol	0.45	0.00	Condición de diseño.
Razón de reflujo	1.5	1.2	Condición de diseño
Flujo de amina rica, GPM ⁴	(1200)	(750)	Condición de diseño

¹ LSE. Límite superior especificado

² LIE. Límite inferior especificado

³ Esta especificación corresponde a la concentración de gases ácidos en la amina pobre; sin embargo, en los análisis de laboratorio no se está reportando la concentración de CO₂ en dicha corriente

⁴ Flujo de 0.7571 m³s⁻¹ (1200 GPM), 0.0473 m³s⁻¹ (750 GPM), donde GPM son galones por minuto

Capacidad del proceso

De acuerdo con los criterios de estabilidad Western Electric (Montgomery, 2005) y el histograma de frecuencias, la concentración de H₂S en la amina pobre no está controlada, ver Figura 14. Sin embargo, la concentración está por debajo del límite superior especificado. El C_{PK} para esta variable es 0.18, ver Tabla 6, lo cual indica que la variable tiene una dispersión mayor que la definida por los límites especificados. Sin

embargo, se aprecia que en la mayoría de los casos la concentración se ubica cerca del LIE.

De acuerdo con la Figura 16, la temperatura en los fondos de la regeneradora presenta algunas regiones inestables según los criterios Western Electric (Montgomery, 2005); sin embargo, se encuentra dentro de los límites especificados y con un C_{PK} de 28.5 que indica que el estándar de calidad actual para esta variable se encuentra muy por arriba de los parámetros seis sigma (Montgomery, 2005).

Respecto de las variables de presión en el domo de la regeneradora, temperatura en el domo de la regeneradora, concentración de gases ácidos en la carga, relación de reflujo y flujo de amina rica se observa que se encuentran controladas y, salvo algunos puntos, cumplen con los criterios de estabilidad Western Electric (Montgomery, 2005), ver Figuras 15 y 17 a 20.

Tabla 6

Límites actuales de control y C_{PK} de las variables críticas del subsistema de regeneración de amina

Variable	LSC ¹	LIC ²	C_{PK}
Concentración de H ₂ S en la amina pobre	0.004 mol H ₂ S/mol amina	0.01 mol H ₂ S/mol amina	0.18
Presión en el domo de la regeneradora	0.51 kg _f /cm ²	0.49 kg _f /cm ²	15.38
Temperatura de los fondos de la regeneradora	119.95°C	119.68°C	28.56
Temperatura en el domo de la regeneradora	103.8°C	102.4°C	-1.55
Concentración de gases ácidos en la amina rica	0.374 %mol	0.345 %mol	6.22
Razón de reflujo	3.4	2.7	4.82
Flujo de amina rica, GPM ³	(982)	(860)	2.81

Indica que el límite está por arriba o por abajo del límite especificado

¹ Límite superior de control

² Límite inferior de control

³ GPM, galones por minuto, que equivalen a 0.062 m³s⁻¹ (982 GPM) y 0.05426 m³s⁻¹ (860 GPM)

De acuerdo con la Tabla 6, las variables presión en el domo de la regeneradora, temperatura de los fondos de la regeneradora, concentración de gases ácidos en la amina rica y flujo de amina rica se encuentran dentro de las especificaciones y tienen un C_{PK} de bueno a muy bueno. Por otro lado, la temperatura en el domo de la regeneradora y la razón de reflujo cuentan con C_{PK} negativo lo que indica que los límites de control se encuentran fuera de los límites especificados y, en este caso, se encuentran por arriba. Es necesario llevar estas variables dentro de sus límites especificados.

CONCLUSIONES

El control estadístico funcionará de manera adecuada siempre y cuando el proceso se encuentre bajo control y cumpla con los diferentes criterios de estabilidad, por lo que se sugiere aplicar las metodologías estadísticas necesarias y las medidas pertinentes para mantener el proceso estable y controlado.

Mediante la aplicación del *control estadístico de proceso* se puede realizar la toma de decisiones con base en las relaciones causa-efecto y se pueden establecer las variables críticas para cualquier proceso. Sin embargo, es importante contar con suficiente información estadística que, además, sea confiable.

Mediante el análisis estadístico y de diseño del proceso en particular es posible reducir el número de variables críticas.

Dado que la aplicación del control estadístico de procesos se rige bajo el concepto de mejora continua, cada cierto tiempo deben evaluarse los resultados obtenidos para, en un determinado caso, reevaluar desde los límites inferiores y superiores hasta la definición de *KPI* y *KOP*.

Por último, es factible aplicar el control estadístico en tiempo real que permita una respuesta oportuna ante desviaciones en el proceso. Esta implementación se puede realizar con algún software de seguimiento de las condiciones del proceso como podría ser el programa *Pi ProcessBook®* con su complemento *SQC*.

NOMENCLATURA

A	Sigla que indica que llegan dos señales (<i>TC</i> , <i>TDIC</i>)
AD	Anderson-Darling; siglas para la prueba correspondiente
Análisis	Análisis de repetibilidad y reproducibilidad
RyR	
C	Sigla en inglés para <i>Customers</i> (clientes)
CEP	Control estadístico de procesos
C _p	Capacidad del proceso (del inglés <i>Process capability</i>)
C _{PK}	Índice de capacidad del proceso (del inglés <i>Process capability index</i>)
C _{PL}	Índice de capacidad del proceso para especificaciones con límite inferior
C _{PM}	Siglas en inglés para el Índice de Capacidad de Teguchi
C _{PU}	Índice de capacidad del proceso para especificaciones con límite superior
ENT	Equipo natural de trabajo
FIC	Siglas en inglés para <i>Flow Indicator Control</i> (controlador de flujo)

FV	Siglas en inglés para <i>Flow Valve</i> (válvula de flujo)
FT	Siglas en inglés para <i>Flow Transmitter</i> (transmisor de flujo)
FMEA	Siglas en inglés para F– <i>Failure</i> (Falla), M– <i>Mode</i> (Modo), E– <i>Effects</i> (Efectos), A– <i>Analysis</i> (Análisis). Análisis de modos y efectos de fallas.
GPM	Galones por minuto (unidad inglesa)
I-MR	Rangos móviles individuales, por sus siglas en inglés (<i>individual moving ranges</i>)
I	Siglas en inglés para <i>Inputs</i> (entradas)
KOP	Parámetros clave de operación, por sus siglas en inglés
KPI	Indicadores clave del proceso, por sus siglas en inglés
LCL	Límite inferior de control, por sus siglas en inglés o LIC en español
LIC	Siglas en inglés para <i>Level Indicator Control</i> (Controlador de nivel)
LSL	Límite inferior especificado, por sus siglas en inglés o LIE en español
LT	Siglas en inglés para <i>Level Transmitter</i> (transmisor de nivel)
LV	Siglas en inglés para <i>Level Valve</i> (válvulas de nivel)
MDEA	Mono-dietanol amina
MR	Siglas en inglés para <i>Moving Ranges</i> (rangos móviles)
O	Sigla en inglés para <i>Outputs</i> (salidas)
P	Sigla en inglés para <i>Process</i> (proceso)
p	Valor de pruebas estadísticas
PIC	Siglas en inglés para <i>Pressure Indicator Control</i> (controlador de presión)
Pp	Siglas en inglés para <i>Process performance</i> (desempeño del proceso)
Ppk	Siglas en inglés para <i>Process performance index</i> (índice de desempeño del proceso)
PV	Siglas en inglés para <i>Pressure Valve</i> (válvula de presión)
PT	Siglas en inglés para <i>Pressure Transmitter</i> (transmisor de presión)
R	Sigla en inglés para <i>Requirements</i> (requisitos)
r	Relación (positiva, negativa, no hay correlación)
R ²	Coefficiente de determinación
S	Sigla en inglés para <i>Suppliers</i> (proveedores)
SIPOC	Siglas en inglés para: S– <i>Suppliers</i> (proveedores), I– <i>Inputs</i> (entradas), P– <i>Process</i> (proceso), O– <i>Outputs</i> (salidas), C– <i>Customers</i> (clientes)
TT	Siglas en inglés para <i>Temperature Transmitter</i> (transmisor de temperatura)
TIC	Siglas en inglés para <i>Temperature Indicator Control</i> (controlador de temperatura)

UCL	Límite superior de control, por sus siglas en inglés o LSC en español
USL	Límite superior especificado, por sus siglas en inglés
X	Variables de entrada
Y	Variables de salida

LETRAS GRIEGAS

μ	Media de una variable
σ	Desviación estándar de una variable

BIBLIOGRAFÍA

Broersen, P.M.T. 2006. *Automatic autocorrelation and spectral analysis*. Springer Verlag. Berlín, RFA.

Chatterjee, S., Hadi, A. S. 2006. *Regression analysis by example*. Wiley Interscience. 4a ed. Nueva York, NY, EEUU.

Chico-Morales, J.A. 1991. *La calidad y sus evidencias estadísticas: competitividad y satisfacción del cliente*. IMIQ. México D.F., México.

Härdle, W., Simar, L. 2007. *Applied multivariate statistical analysis*. 2a ed. Springer Verlag. Berlín, RFA.

Holmes, D.S. 1997. *Statistical process control: Basics and advanced topics*. The Center for Professional Advancement. New Brunswick, NJ, EEUU.

Kachigan, S.K. 1991. *Multivariate statistical analysis*. 2a ed. Radius Press. Nueva York, NY, EEUU.

McCarty, T., Daniels, L. 2004. *The Six Sigma Black Belt Handbook (Six SIGMA Operational Methods)*. 1a ed. McGraw-Hill. Nueva York, NY, EEUU.

Melo-González, R., Lara-Hernández, C., Herrera-Ruiz, D.A., Valdez-Gómez, J.A. 2010. Control estadístico de procesos en tiempo real en plantas endulzadoras de gas amargo. Metodología, aplicación y resultados. En *1er Congreso de Confiabilidad Operacional PEP 2010*. PEMEX Exploración y Producción. 25 y 26 de noviembre. Villahermosa, Tabasco, México.

Montgomery, D.C. 2005. *Introduction to statistical quality control*. 5a Ed. John Wiley & Sons Inc. Nueva York, NY, EEUU.

Pande, P.S., Neuman, R.P., Cavanaugh, R.R. 2000. *The Six Sigma Way*. Mc Graw Hill. Nueva York, NY, EEUU.

Qin, S.J. 1998. *Multivariate Statistical Process Control*. Department of Chemical Engineering. University of Texas. XVIII Seminario de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Celaya. Guanajuato, México.

Williams, M.A., Bertels, T., Dershin, H. 2001. *Rath & Strong's Six Sigma Pocket Guide*. 6a ed. AON Management Consulting. Lexington, MA, EEUU.

Vázquez-Martínez, A., Melo-González, R., Rodríguez-Chiquito, V.M. 1998. *Identifying and analysis of key variables at the Terminal Maritima de Dos Bocas using statistical process control*. Society of Petroleum Engineers. March 3-5. Villahermosa, Tab. México.